

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1 Objectifs et messages du montage | 1 |
| 2 Introduction générale du montage | 1 |
| 3 Proposition de plan | 1 |
| 3.1 Modèle électrique | 2 |
| 3.2 Transduction électromécanique | 5 |
| 3.3 Réponse acoustique. | 7 |
| 4 Expériences possibles | 9 |
| 5 Bibliographie | 10 |

1 Objectifs et messages du montage

- ▷ Caractériser un haut parleur depuis le circuit électrique jusqu'au son émis, caractériser la transduction électro-acoustique (en passant par l'électro-mécanique)
- ▷ Quelles caractéristiques du haut parleur vont déterminer son utilisation ?
- ▷ Montrer que le haut parleur n'est pas qu'un objet acoustique mais est aussi électronique

2 Introduction générale du montage

Le haut parleur permet de transformer le signal électronique d'un son en signal acoustique. On va chercher dans notre démarche expérimentale à caractériser chaque étape de cette transformation, depuis le branchement du haut parleur à un circuit électrique jusqu'à l'analyse du son émis.

On va étudier trois phases de la transduction électro-acoustique : la réponse électrique du haut parleur, la transduction électromécanique de la membrane et enfin la réponse acoustique du haut parleur.

3 Proposition de plan

- ▷ **Modèle électrique**
 - Profil spectrale de l'impédance électrique
 - Mesure de la compliance acoustique, c'est-à-dire la constante de raideur du haut parleur
- ▷ **Transduction électromécanique**
 - Linéarité entre tension d'alimentation et déplacement de la membrane
- ▷ **Réponse acoustique**
 - Diagramme de Bode acoustique en amplitude
 - Diagramme de rayonnement acoustique

3.1 Modèle électrique

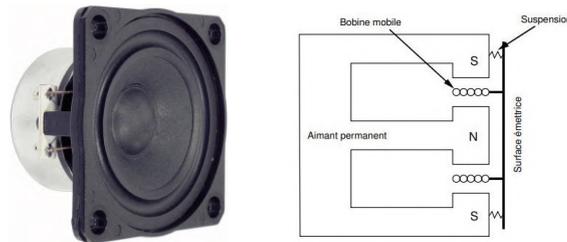


Fig. 1 – Schéma du haut parleur

Si on soumet la bobine à une tension alternative $v(t)$, elle est parcourue par un courant variable $i(t)$. Or la bobine est plongée dans un champ magnétique radial créé par un aimant permanent (Figure 1), cela induit par force de Laplace un mouvement de la bobine et entraîne la membrane. Inversement, lorsque le haut-parleur reçoit une onde acoustique qui déplace la membrane, la bobine translate dans un champ magnétique radial. Une force électromotrice est créée dans la bobine, qui fait varier la tension à ses bornes donc le haut parleur fonctionne en micro.

Pour des amplitudes et des fréquences pas trop élevées, on peut écrire les équations mécaniques et électriques du système.

Équation mécanique :

$$m \frac{dv}{dt} + rv + k \int v dt = Bli$$

On voit apparaître trois forces, une force d'amortissement de coefficient r traduisant les frottements visqueux du système et la perte énergétique du haut-parleur par rayonnement sonore, une force de rappel élastique de raideur k des fixations de la membrane du haut parleur et enfin la force de Laplace due aux variations de l'intensité dans le circuit électrique.

Équation électrique :

$$L \frac{di}{dt} + RI = U - Blv$$

On retrouve l'effet de l'inductance et résistance interne du haut parleur en série avec la tension de commande U et la tension due à la force électromotrice.

On peut alors en déduire l'impédance électrique totale du haut parleur Z en se plaçant en régime sinusoïdal forcé :

$$Z(j\omega) = R + jL\omega + \frac{B^2 l^2}{r + j(m\omega - k/\omega)} = Z_e + Z_c$$

On remarque deux termes que l'on peut interpréter comme la somme d'une impédance électrique de l'appareil immobilisé, membrane immobile $Z_e = R + jL\omega$, et d'une impédance cinétique, impédance électromotrice $Z_c = \frac{B^2 l^2}{r + j(m\omega - k/\omega)}$.

► Profil spectral de l'impédance électrique

On peut regarder l'évolution du module de l'impédance du haut parleur en traçant un diagramme de Bode.

On veut tracer le diagramme de Bode en amplitude de l'impédance électrique du haut parleur. On cherche donc à avoir l'évolution en fréquence du rapport tension sur intensité dans le haut parleur. Pour connaître l'intensité dans le haut parleur on utilise une résistance de 22.2Ω dont la tension est image de l'intensité et on prend la tension aux bornes du haut parleur (attention ne pas prendre celui avec un dichroïque fixé dessus, ce dernier change la réponse spectrale). Cependant, ce montage requiert d'utiliser des sondes différentielles (on ne peut pas imposer la masse de l'oscilloscope en deux points du circuit) et ces dernières ajoutent un gain 1/10 donc les deux mesures se feront avec des sondes différentielles pour qu'en faisant le rapport des tensions les gains se compensent. **De plus, quand on utilise un haut parleur avec un GBF il est nécessaire d'utiliser un amplificateur de puissance en tension car le GBF délivre un courant**

faible et le haut parleur à une impédance faible donc l'amplificateur joue le rôle d'adaptation d'impédance entre le GBF et le haut parleur. (Figure 2)

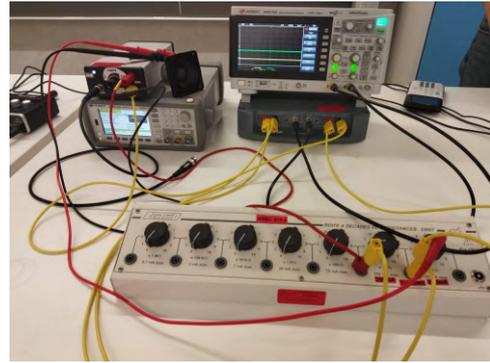
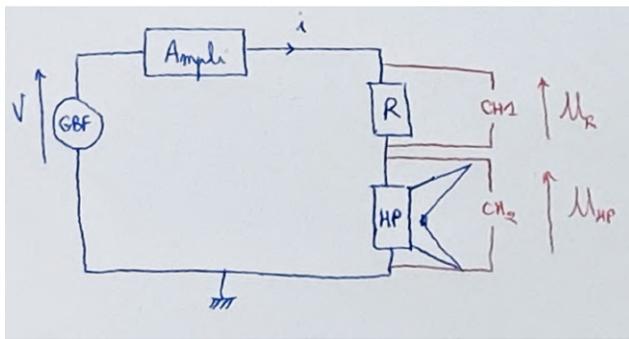


Fig. 2 – Schéma et photo du montage pour l'impédance du haut parleur

Pour obtenir le diagramme de Bode, on utilise la macro d'Igor. On envoie un sinus cardinal de $10V_{pp}$. Le fait que le sinus cardinal comprenne des tensions négatives n'est pas problématique puisque la membrane du haut parleur peut aller dans les deux sens de déplacement (positif et négatif). On obtient le diagramme de Bode en amplitude de l'impédance électrique du haut parleur. (Figure 3)

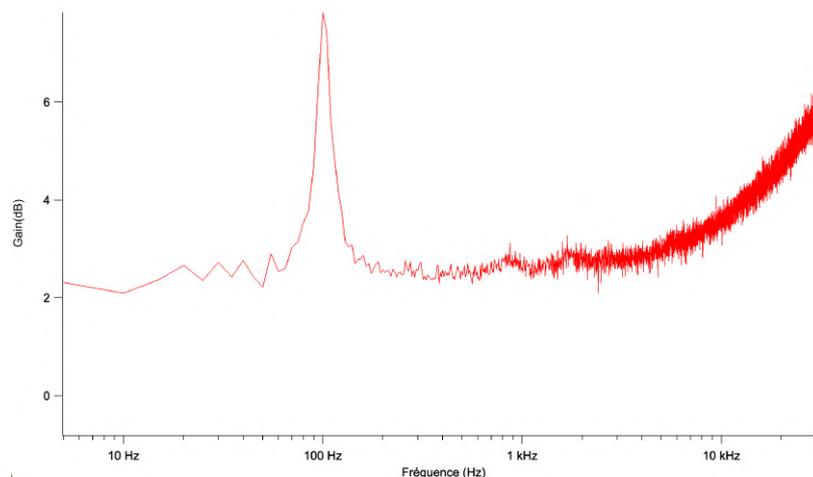


Fig. 3 – Évolution en fréquence de l'impédance électrique du haut parleur

On observe bien deux régimes, à haute fréquence une croissance linéaire de l'impédance : c'est le régime purement électrique du haut parleur avec une impédance de $Z_e = R + jL\omega$, à basse fréquence on observe la résonance électromotrice. La résonance est bien due à la réponse mécanique de la membrane puisque si on fixe cette dernière la résonance disparaît. En utilisant la formule analytique de l'impédance, on sait que la fréquence de résonance f_0 est :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = (117 \pm 5) Hz$$

L'incertitude est évaluée en regard de la fréquence d'échantillonnage utilisée sous Igor. On pourrait améliorer cette mesure de deux manières : prendre un temps d'acquisition plus long pour avoir plus de points mais on attend plus longtemps ou recentrer le diagramme de Bode autour de la résonance mais on perd alors le régime purement électrique.

En pratique, le haut parleur est utilisé pour des fréquences plus haute que la fréquence de résonance électromécanique. En effet, la résonance augmente brusquement la sensibilité et les distorsions donc on se place au delà. Ainsi plus la fréquence de résonance est basse, plus le haut parleur peut délivrer des basses. Ici, la résonance est à $f_0 = (117 \pm 5) Hz$ ce qui est déjà important, on a un haut parleur médium, les haut parleurs basse fréquence ont une résonance de l'ordre de $30 Hz$.

► Mesure de la compliance acoustique

On remarque que la résonance étant un effet électromécanique, sa valeur dépend directement de la masse mobile du haut parleur c'est-à-dire la masse de la membrane ; plus la membrane est grande, plus elle est lourde et le haut parleur pourra descendre dans les basses fréquences. Elle dépend également de la constante de raideur du haut parleur, plus la constante de raideur d'un haut parleur est grande plus ce dernier sera performant dans les aigus.

On va donc s'intéresser à la constante de raideur du ressort k du haut parleur qui est l'inverse de la compliance acoustique donnée par les fabricants. Pour mesurer ce paramètre, on va faire varier la masse mobile du haut parleur par ajout de petites masses sur la membrane. En pratique, on colle des pièces de monnaie au centre du haut parleur avec de la pâte à fixe. En traçant l'évolution de la fréquence de résonance on pourra déterminer la constante de raideur et la masse de la partie mobile du haut parleur.

On utilise le même montage électrique que pour l'impédance acoustique et on va tracer les diagrammes de Bode en amplitude pour chaque ajout de masse.

On écrit alors la masse mobile telle que $m = m_0 + m_{ajoutée}$. On peut alors tracer $m_{ajoutée} = f(\frac{1}{\omega_0^2})$ dont la pente est la constante de raideur et l'ordonnée à l'origine l'opposé de la valeur de la masse mobile du haut parleur. (Figure 4)

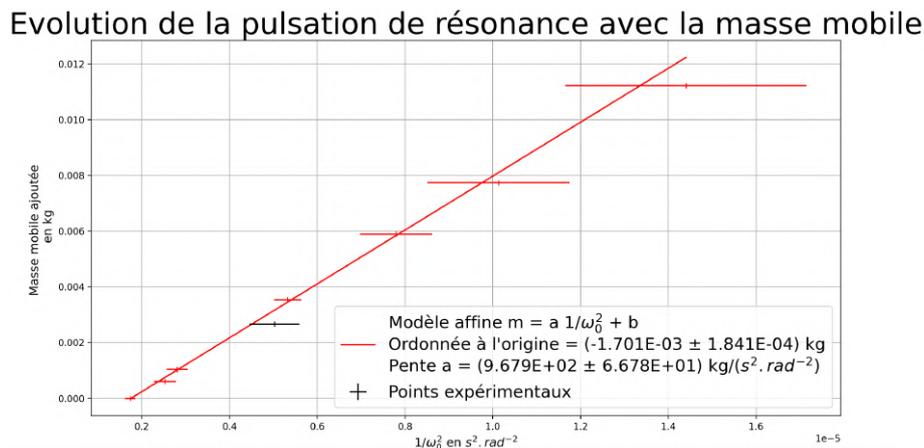


Fig. 4 – Évolution de la pulsation de résonance par changement de la masse mobile

Les points sont alignés et équirépartis autour de la droite d'ajustement, ce dernier est donc validé. La pente de l'ajustement nous donne directement la constante de raideur, $k = (968 \pm 67)N.m^{-1}$. De plus, l'ordonnée à l'origine donne la masse mobile du haut parleur $m_0 = (1.7 \pm 2)g$.

Ces valeurs sont à comparer avec celles fournies par le fabricant, ce dernier fournit la valeur de la compliance et par inverse la constante de raideur $k_{tab} = 639N.m^{-1}$, cette valeur est nettement en dessous ce qui peut être expliqué par le fait que le haut parleur peut se rigidifier en vieillissant mais aussi parce que le haut parleur utilisé a été un peu déformé. De même la masse de la membrane mobile est du même ordre de grandeur $m_{0tab} = 1.9g$.

Les incertitudes ont été quantifiées lors de la pesée de la masse, balance précise à 0.01g, et également lors du relevé de la fréquence de résonance. Dans cette expérience on ne s'intéresse qu'à la résonance donc, en préparation, on peut mesurer la fréquence de résonance en régime sinusoïdal forcé en faisant varier la fréquence du GBF. Avec cela on s'affranchit de la limite d'échantillonnage de Igor, on va au delà des limites de la macro, et on peut réduire nos incertitudes. En direct on peut faire la macro pour avoir les deux régimes de l'impédance, on sera moins précis sur la résonance mais on peut expliquer la démarche de la préparation et on gagne du temps.

Cette caractéristique varie en fonction du type de haut parleur, s'il est fait pour transmettre des sons graves, aigus ou médium, ce qui est très intéressant pour les home cinémas où l'on veut utiliser un haut parleur adapté pour chaque son et donc avoir le meilleur son possible. Ici, le haut parleur est un médium donc sa raideur permet de transmettre un large spectre de fréquences au centre de la bande audible.

3.2 Transduction électromécanique

Le haut parleur transforme un signal, une énergie électrique en un déplacement, une énergie mécanique qui est l'initiation d'une onde acoustique. Si on augmente l'amplitude de l'intensité et donc la tension aux bornes du haut parleur, on augmente l'amplitude de vibration de la membrane. On cherche à vérifier la linéarité du haut parleur, pour se faire on utilise un haut parleur sur lequel est fixé un miroir dichroïque. Ainsi grâce à un laser vert (un rouge pourrait endommager le dichroïque) et une diode quatre quadrants on peut mesurer les déplacements de la membrane. La photodiode quatre quadrants est en réalité composée de quatre photodiodes dont les signaux sont soustraits pour en déduire les déplacements d'un faisceau suivant les deux axes du plan.

► Étude en régime continu

On étudie tout d'abord le déplacement de la membrane commandé par une intensité continue en sortie d'une alimentation stabilisée. On met en série l'alimentation, un ampèremètre et le haut parleur. On règle l'orientation et la hauteur du laser, du haut parleur et de la photodiode, de manière à ce que le laser se réfléchisse sur le miroir et arrive sur la photodiode quatre quadrants en son centre (offset nul à l'oscilloscope quand le faisceau est centré suivant l'axe X). (Figure 5) Cette dernière est reliée à un boîtier qui calcule le déplacement relatif qu'elle perçoit suivant les 2 dimensions de l'espace (on s'intéresse dans l'expérience au déplacement selon X puisque la membrane se déplace suivant Z). La sortie "Axe x" de ce boîtier est relié à un voltmètre. On pourra y lire une tension proportionnelle au déplacement de la membrane du haut parleur.

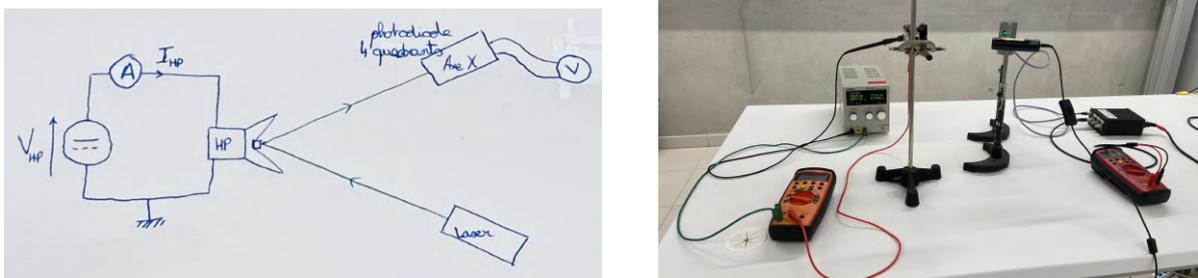


Fig. 5 – Étude du déplacement de la membrane

On fait ici l'étude du déplacement pour une tension constante, il nous suffit de lire l'intensité de commande et la tension aux bornes de la photodiode. Cependant on ne connaît pas la position initiale du laser sur la photodiode. On relève donc la tension initiale aux bornes de la photodiode que l'on retranchera à toutes nos mesures. On trace alors l'évolution de la tension de déplacement en fonction de l'intensité de commande. (Figure 6)

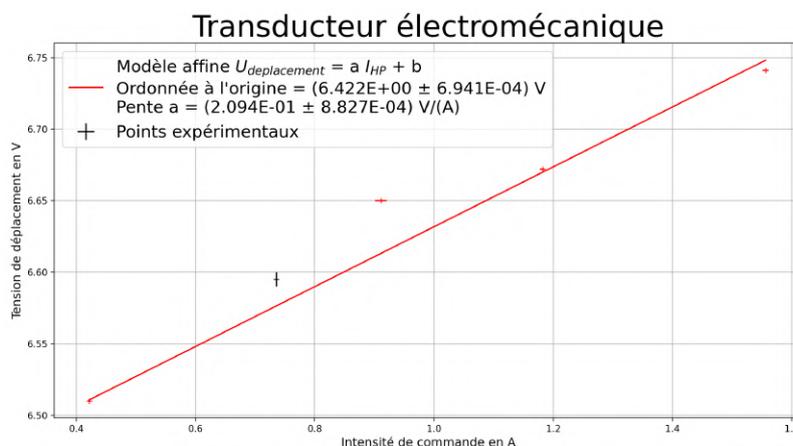


Fig. 6 – Évolution du déplacement de la membrane en régime continu

On remarque que les points ont une tendance affine mais l'alignement n'est pas convainquant. La non-reproductibilité de l'expérience en régime continu peut être due à plusieurs facteurs : les variations de

l'intensité de commande ne sont pas assez significatives la membrane peut se bloquer et donc fausser les mesures, de plus on peut avoir un phénomène d'hystérésis suivant le sens de déplacement de la membrane. Donc l'expérience n'est pas concluante, on a choisi de faire cette étude en régime sinusoïdal forcé.

► Étude en régime sinusoïdal forcé

On va effectuer la même étude mais on utilise un GBF et donc un amplificateur de puissance en tension pour alimenter le haut parleur. On utilise le mode AC des multimètres. On peut aussi utiliser un oscilloscope pour visualiser les tensions aux bornes du haut parleur et de la photodiode. On se place dans cette expérience à une fréquence fixe de 700Hz et on s'intéresse à la tension de la photodiode en fonction de la tension imposée au haut parleur. (Figure 7) On peut faire varier la tension directement en utilisant le gain plutôt qu'en faisant varier l'amplitude du GBF.

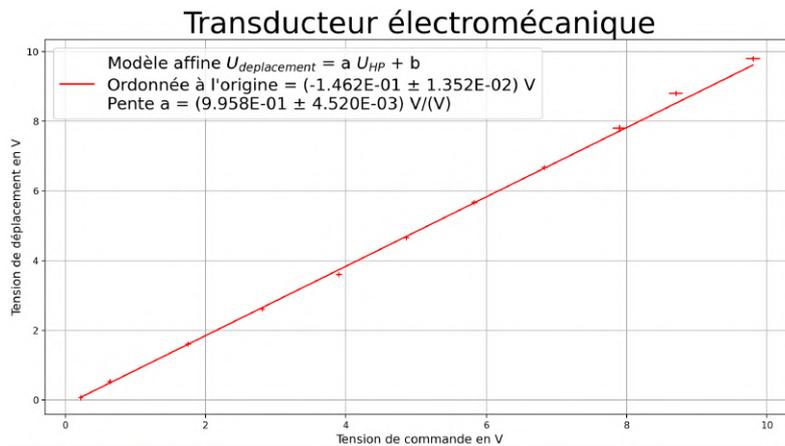


Fig. 7 – Étude du déplacement de la membrane en régime sinusoïdal

On voit dans ce régime que les effets d'hystérésis sont gommés du fait de l'oscillation de la membrane. L'ajustement est beaucoup plus concluant, le haut parleur est donc bien linéaire en régime oscillant qui est le régime utilisé en pratique. La linéarité du déplacement du haut parleur est rassurante puisqu'alors la tension qu'on lui impose est bien retranscrite en déplacement et donc en onde acoustique avec plus de puissance, on contrôle le volume sonore en sortie du haut parleur.

► Étude en fréquence

On peut aussi étudier l'évolution en fréquence de la transduction électromécanique (sera très peu développé ici). On utilise la macro de Igor pour faire, en se restreignant à la plage des sons audibles et avec un pas en fréquence de 100Hz . On obtient la réponse en fréquence. (Figure 8)

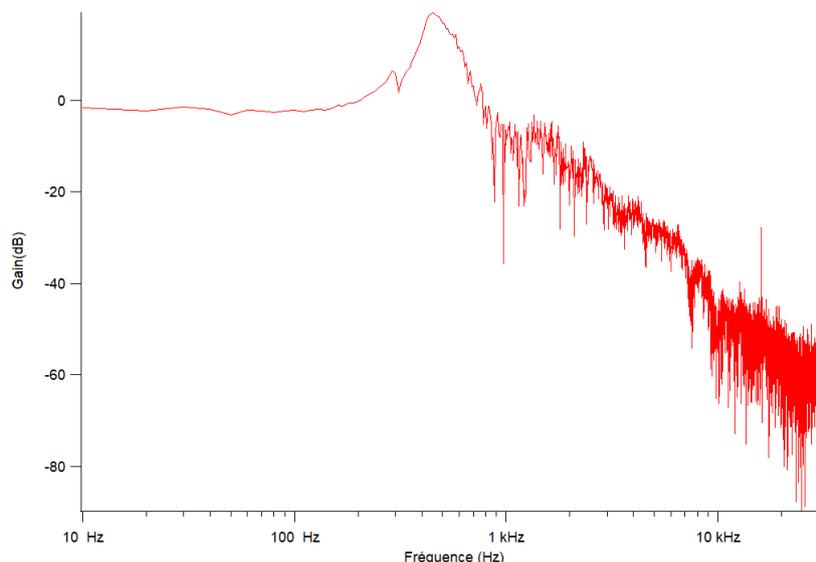


Fig. 8 – Réponse en fréquence du déplacement de la membrane

On observe que la transduction électromécanique est moins efficace à haute fréquence. En effet, plus la fréquence est haute plus la membrane doit vibrer rapidement et donc la réponse mécanique n'a pas le temps de suivre et on retrouve un passe bas du deuxième ordre.

3.3 Réponse acoustique

On a caractérisé la réponse électrique et électromécanique du haut parleur, il délivre alors une onde acoustique dans l'espace. Le son émis par le haut parleur est le phénomène qui nous intéresse, c'est la finalité du haut parleur. On va donc chercher à caractériser le son.

► Diagramme de Bode en amplitude du son émis

On trace le diagramme de Bode en amplitude acoustique du haut parleur. On utilise la macro du logiciel Igor pour tracer le diagramme. Il faut donc retransformer le signal acoustique émis par le haut parleur en un signal analogique visualisé sur l'oscilloscope. On ne veut pas que le signal reçu ne soit déformé, on utilise donc un micro à réponse plate en fréquence c'est-à-dire que la transformation acoustique électrique est identique quelle que soit la fréquence du son. On utilise un GBF et un amplificateur de puissance en tension pour alimenter le haut parleur avec Igor. On regarde sur l'oscilloscope la tension d'entrée du haut parleur donc aux bornes de l'amplificateur. En ce qui concerne le micro, on utilise également un gain en sortie pour obtenir le signal électrique avec la plus grande amplitude possible sans que le signal ne sature. On regarde le signal de sortie du micro sur l'oscilloscope. (Figure 9) L'amplificateur utilisé a un gain assez important donc ce dernier doit être muni d'une alimentation fantôme de 48V pour le supporter.

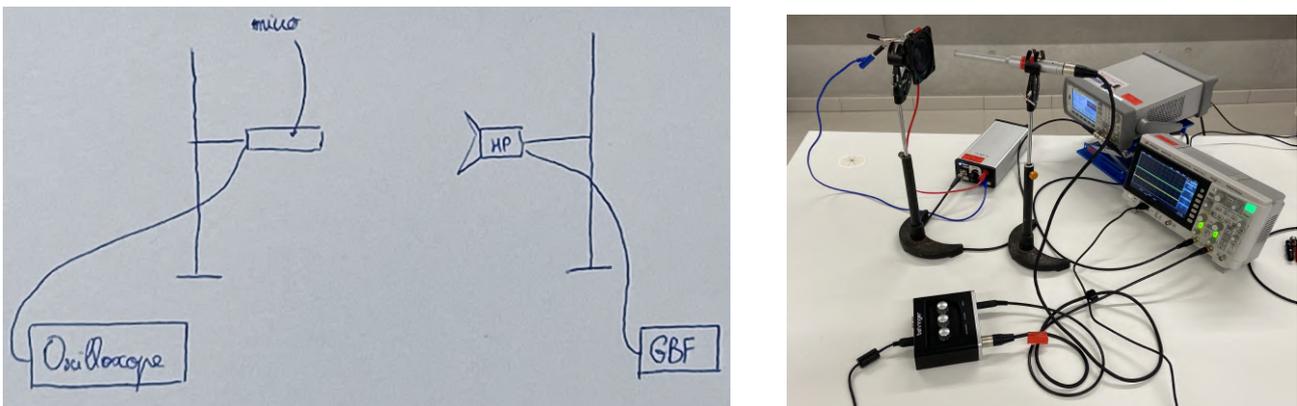


Fig. 9 – Schéma et photo du montage pour tracer le diagramme de Bode acoustique du haut parleur

On a donc le diagramme de Bode de la réponse acoustique du haut parleur. On peut voir clairement une plage de fréquences pour lesquelles la réponse du haut parleur est maximale. On peut alors parler d'une plage d'émission (ATTENTION de ne pas parler de bande passante qui induit une coupure à $-3dB$). On mesure alors les fréquences de début et fin de cette bande d'émission à $f_{début} = (1.7 \pm 0.4)kHz$ et $f_{fin} = (10.5 \pm 1)kHz$. (Figure 10)

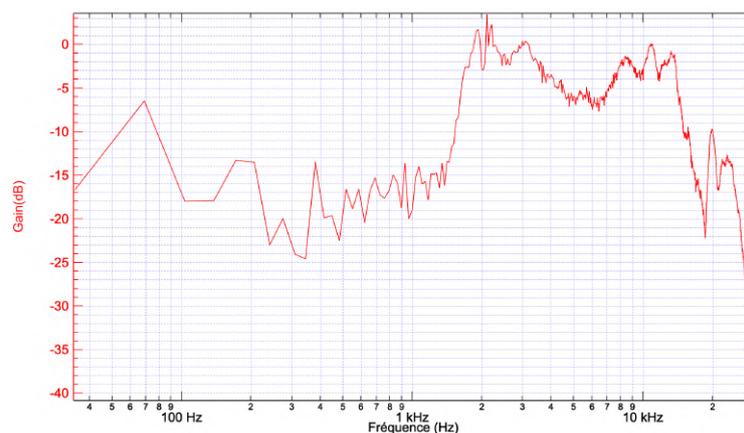


Fig. 10 – Diagramme de Bode en amplitude de la réponse acoustique du haut parleur

On ne peut pas analyser les valeurs du gain du diagramme en fréquence puisqu'on utilise le micro avec un gain que l'on ne connaît pas. Cependant les valeurs de bande d'émission sont en accord avec un haut parleur médium, c'est-à-dire qu'il est performant dans une plage centrale dans les fréquences audibles.

► Diagramme de rayonnement du son émis

On vient de caractériser la réponse acoustique en fréquence du haut parleur, on peut à présent s'intéresser à la directivité de l'émission ; est ce que si on tourne autour du haut parleur, on perçoit le même son ? Pour ce faire, on va effectuer un diagramme de rayonnement du haut parleur. On mesure l'intensité reçue par un micro en fonction de sa direction de réception. Pour faciliter le montage plutôt que de faire tourner le micro autour du haut parleur on va faire l'inverse. Le haut parleur est placé au centre d'un plateau tournant qui est contrôlé par une alimentation 6V avec un bouton pour régler la vitesse, cette dernière sera fixée au maximum durant toute l'expérience. Le micro est fixé sur une potence à la même hauteur que le haut parleur et à une distance d'environ 40 à 60 cm. On peut donc faire tourner le haut parleur autour du micro, il faut à présent connaître l'angle entre la sortie du haut parleur et le micro. Deux méthodes sont possibles :

- Le plateau tournant possède un potentiomètre rotatif qui donne une tension proportionnelle à l'angle du plateau. En étalonnant le capteur on peut donc remonter directement à l'angle du haut parleur par rapport au micro. Cependant lorsque le potentiomètre arrive en bout de course il freine le plateau avant de repartir donc il faut commencer le tour à cet angle pour que le phénomène ne perturbe pas la rotation.

- On ne connaît pas l'existence de ce capteur ... il faut ruser. On utilise le support du réseau ultrasonore qui est transparent avec des traits noirs. Ainsi avec une fourche optique, en faisant tourner le plateau et en regardant le signal de la fourche optique à l'oscilloscope, on peut en déduire la vitesse angulaire du plateau en connaissant le nombre de traits pour 180°. Durant l'expérience, en sachant quand est ce que le plateau tourne on sait quand l'expérience commence et termine donc on connaît les mesures du micro à analyser (on sélectionne les points intéressants sur Igor ou avec un programme python). Cependant cette méthode fait quelques hypothèses, on suppose que la vitesse de rotation est uniforme sur un tour (ce qui n'est pas forcément évident) et on suppose qu'en se mettant en butée du contrôle de vitesse cette dernière sera toujours la même pour toutes les expériences.

Pour faire le montage, on utilise donc un micro à réponse plate avec son alimentation et son gain dont on regardera son signal de sortie sur l'oscilloscope. On alimente le haut parleur avec un GBF et un amplificateur de puissance en tension. (Figure 11) Le GBF délivre une tension sinusoïdale de fréquence fixée (On pourra la faire varier entre deux mesures) de $1V_{pp}$ et on peut faire varier l'intensité sonore du haut parleur directement avec l'amplificateur de puissance. On regarde alors sur l'oscilloscope le signal du micro sur la voie 1 et suivant la méthode choisie soit la tension aux bornes du potentiomètre pour connaître l'angle ou aux bornes du moteur pour savoir quand le plateau tourne.

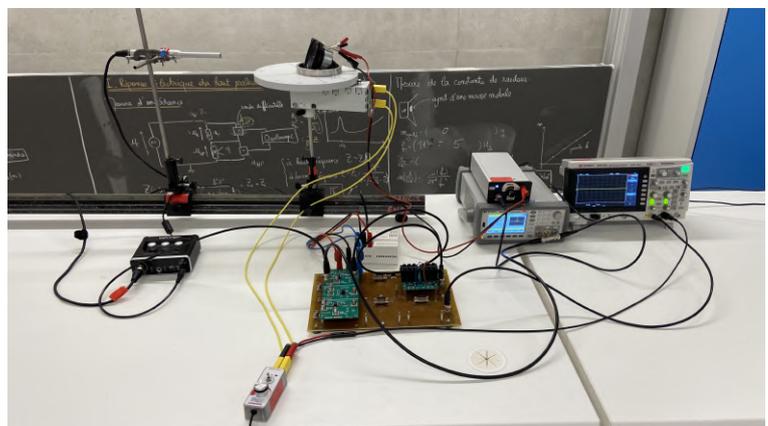
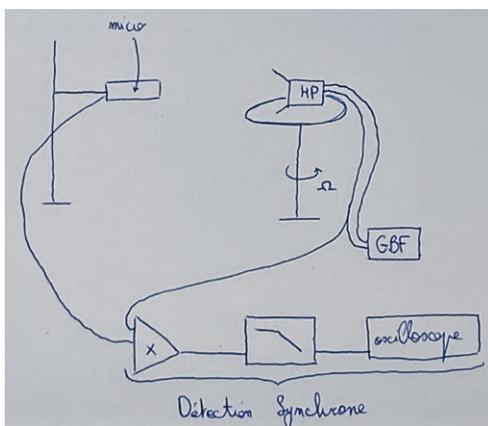


Fig. 11 – Schéma et photo du montage pour tracer le diagramme de rayonnement du haut parleur

On remarque sur l'oscilloscope que le signal est très bruité, on utilise le mode 'High resolution' mais on observe toujours que le bruit ambiant et notamment le bruit fait par le moteur du plateau tournant perturbe la mesure. On met en place une détection synchrone du signal. On multiplie le signal en entrée du

haut parleur (donc aux bornes de l'amplificateur en puissance) avec le signal de sortie du micro. On utilise un filtre passe bas ($R = 10k\Omega$ et $C = 4.7F$) pour couper la composante haute fréquence et ne garder que la composante continue qui est proportionnelle à l'intensité sonore reçue par le micro. On observe alors sur l'oscilloscope le signal de sortie de la détection synchrone. Le signal n'est pas bruité et varie bien avec l'angle entre le haut parleur et le micro. (Figure 11)

On récupère le signal en mode 'Roll' sur l'oscilloscope en choisissant une base de temps maximale pour l'acquisition. Les données sont récupérées avec la macro de Igor et traitées avec Python. On veut tracer l'intensité sonore reçue par le micro en fonction de l'angle de réception, le graphe le plus adapté est le graphe polaire. Pour pouvoir superposer les courbes pour différentes fréquences d'émission, on choisit de tracer l'atténuation du signal sonore en fonction de l'angle, c'est-à-dire qu'on trace $20 * \log(\frac{U}{U_{max}})$ avec U_{max} qui est la tension reçue du micro proportionnelle à l'intensité sonore. (Figure 12)

Diagramme de rayonnement

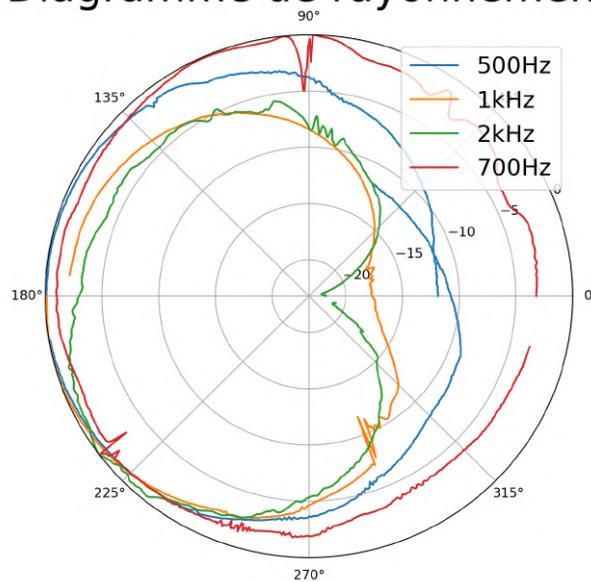


Fig. 12 – Diagramme du rayonnement du haut parleur

On peut observer dans un premier temps ce qui semble évident, le haut parleur délivre une puissance maximale dans la direction de vibration de la membrane soit l'intensité reçue est maximale en face du haut parleur. De plus on observe que l'intensité sonore est non nulle lorsque le micro est à l'arrière du haut parleur. Le son émis est une onde sphérique qui se propage dans tout l'espace donc le micro reçoit une intensité non nulle lorsqu'il est à l'arrière du haut parleur. Cependant on remarque que plus la fréquence est élevée plus cet effet est réduit, le son émis à haute fréquence est plus directif qu'un son basse fréquence.

De plus, on s'attend à ce que le diagramme de rayonnement soit symétrique par rapport à l'axe 0° . On voit clairement que le lobe inférieur est plus gros que le lobe supérieur, ceci est dû aux réflexions. Sur le lobe supérieur, le haut parleur était tourné vers la classe alors que le lobe inférieur le haut parleur était dirigé vers le tableau qui se trouvait à environ 1-2m ; donc l'onde se réfléchissait sur le tableau et l'intensité reçue par le micro était plus grande. Si on veut éviter ce phénomène on peut mettre des mousses sur les parois à proximité du haut parleur. ATTENTION cela vaut aussi pour vous si vous êtes proche du haut parleur.

4 Expériences possibles

- ▷ Pour la partie transduction il serait possible de faire un rendement du système électro-acoustique. Pour cela, on relève la puissance électrique transmise au haut parleur à l'aide d'un wattmètre et la puissance acoustique émise par le haut parleur avec un sonomètre. On peut alors faire un rendement mais il dépend fortement de la distance entre le haut parleur et le sonomètre. De plus, on utilise alors le sonomètre comme une boîte noire.

- ▷ Dans tout le montage il a été choisi de ne pas parler d'adaptation d'impédance. Cependant on pourrait en parler à plusieurs endroits :
 - Le haut parleur ayant une impédance électrique faible (8Ω) il est nécessaire de faire une adaptation d'impédance avec un amplificateur de puissance en tension.
 - Il y a également une adaptation d'impédance avec l'air lors de l'émission acoustique, pour essayer de la quantifier ou au moins de l'expliquer on peut comparer les diagrammes de Bode de la transduction électromécanique et de l'émission acoustique. Ainsi on peut savoir comment à été transformé le mouvement de la membrane en onde acoustique.

5 Bibliographie

- ▷ Poly de TP 'Ondes' de Montrouge
- ▷ 'L'acoustique par l'expérimentation', Mullet-Marquis Cedric, Ellipses

